

0- 786761

На правах рукописи

Киссельман Ирина Фридриховна

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА В  
АППАРАТЕ С ПОДВИЖНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАСАДКОЙ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2011

0- 786761

На правах рукописи

Киссельман Ирина Фридриховна

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА В  
АППАРАТЕ С ПОДВИЖНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАСАДКОЙ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000584047

Казань – 2011

**Диссертация выполнена в Березниковском филиале Пермского государственного технического университета (БФ ПГТУ)**

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, профессор  
**Беккер Вячеслав Филиппович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Загидулин Сапар Хабипуллинович**

доктор технических наук, профессор  
**Николаев Андрей Николаевич**

**Ведущая организация:** ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный технологический  
институт (технический университет)»

Защита состоится «25» марта 2011 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68 (зал заседаний учёного совета), А-330.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет». Автореферат диссертации представлен на сайте [www.kstu.ru](http://www.kstu.ru).

Автореферат разослан «24» февраля 2011г.



Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.080.06

доктор технических наук, профессор

**С.И. Понников**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность проблемы.** Задача интенсификации процессов массообмена и химических превращений в аппаратах с трехфазным псевдооживленным слоем орошаемой насадки (АПН), является актуальной для многих технологий. Способы и методы решения этой задачи (конструктивные, режимные и др.) основаны на усилении интенсивности межфазного взаимодействия за счет увеличения поверхности контакта фаз, повышения скорости движения фаз, турбулизации псевдооживленного слоя.

Одним из способов улучшения взаимодействия элементов многофазных систем является использование дополнительных эффектов, способствующих самоорганизации и турбулизации среды в АПН. Такие эффекты зависят от массовых и инерционных параметров насадочных тел, их формы, количества и характера распределения по объему аппарата. Управление массо-центровочными характеристиками и формой насадочных тел позволяет управлять их перемещениями, что интенсифицирует взаимодействие между ними, структурирует слой и, как следствие, улучшает условия диспергирования и взаимодействия фаз. Такие способы экономически целесообразны, поскольку не требуют существенных капитальных затрат.

В диссертационной работе рассматриваются вопросы комплексной интенсификации процесса массообмена путем управления конструктивными параметрами насадочных элементов в абсорбере с подвижной вращающейся насадкой.

**Цель работы.** Разработка методов расчета и конструирования элементов подвижной вращающейся насадки, обеспечивающей интенсификацию массообменных процессов в трехфазном псевдооживленном слое.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработать методику выбора массо-центровочных характеристик и формы элементов подвижной насадки, обеспечивающих режимы, близкие к идеальному вытеснению;
- разработать математическую модель процесса массообмена в абсорбере с подвижной вращающейся насадкой, имеющей смещенный центр тяжести;
- выполнить экспериментальные и численные оценки основных характеристик трехфазного псевдооживленного слоя;
- исследовать ресурсы организации движения насадочных тел, в частности: ресурс совместного рассеяния энергии частиц; ресурс распределения общей массы по элементам насадки; ресурс структурирования слоя.

**Методы исследования.** Основные теоретические и экспериментальные результаты, представленные в диссертации, основаны на применении, методов теории моделирования, системного анализа, теории оптимизации, планирования и проведения эксперимента, статистической обработки результатов эксперимента, а также методов механики твердого тела.

**Достоверность** положений и выводов диссертационной работы подтверждается адекватностью теоретических и экспериментальных данных, полученных на модельной лабораторной установке, и обеспечивается корректностью постановки задач и методов их решения, корректным использованием методов исследования, использованием инженерного опыта проектирования и разработки оборудования для массообменных процессов.

**Научная новизна работы:**

- найдены зависимости для определения оптимальных конструктивных параметров (формы и эксцентриситета), отличающиеся возможностью их применения для управления ресурсами оптимизации подвижной насадки для массообменных процессов;
- определены соотношения, обеспечивающие оптимальное распределение по массе элементов насадки, имеющих разные размеры;

- разработана уточненная математическая модель процесса абсорбции в абсорбере идеального перемешивания с подвижной вращающейся насадкой, отличающейся наличием смещенного центра тяжести;
- выполнены экспериментальные оценки основных характеристик аппарата с подвижной вращающейся насадкой, имеющей смещенный центр тяжести;
- разработана динамическая модель взаимодействия насадочных элементов, позволяющая исследовать динамику псевдооживленного слоя шаровой насадки в широком диапазоне конструктивных параметров.

**Практическая ценность и реализация работы.** На основе результатов исследований разработаны и внедрены: скруббер для очистки запыленных газов в отделении сушки хлорида калия ОАО «Уралкалий», скруббер для очистки газообразных выбросов от оксидов серы в производстве бумаги на ОАО «Соликамскбумпром».

Лабораторная установка, содержащая подвижную насадку со смещенным центром тяжести, используется в учебном процессе для преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» и в процессе дипломного проектирования для специальности «Машины и аппараты химических производств» в БФ ПГТУ.

#### **На защиту выносятся:**

1. теоретические положения по расчету и конструированию элементов подвижной вращающейся насадки для массообменных процессов;
2. математическая модель массообмена в абсорбере с подвижной вращающейся насадкой, имеющей смещенный центр тяжести;
3. результаты оптимизационных и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были представлены: на IX Московском международном салоне промышленной собственности «АРХИМЕД» (г. Москва, 2006 г.); III региональной конференции «Молодежная наука верхнекамья» (г. Березники, 2006 г.); на международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-21» (г. Тамбов, 2008 г.); на международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-22» (г. Псков, 2009 г.); VII международной научно-практической конференции «Экология и научно-технический прогресс» (Пермь: ПГТУ, 2008).

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 163 страницах, включает 76 рисунков, 3 таблицы, библиография 163 наименования и 6 приложений.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** рассмотрены вопросы актуальности тематики диссертационной работы, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, выбрана методика исследований, сформулирована научная новизна и практическая полезность работы. Приведены основные публикации, структура и объем работы, ее краткое содержание.

**В первой главе** представлен литературный обзор и анализ конструктивных разновидностей АПН. Рассмотрено влияние различных конструктивных и режимных факторов на показатели массоотдачи в АПН. К основным достоинствам АПН следует отнести: высокую интенсивность массообменных процессов, возможность одновременного совмещения нескольких стадий производственного процесса, широкий диапазон нагрузок по газу и жидкости, простоту конструкции. На рис. 1. представлены зависимости коэффициента массоотдачи в газовой фазе от скорости газа в АПН, а также сравнительные данные по величине коэффициента массоотдачи в аппаратах другого типа. При одних и тех же режимных параметрах АПН по сравнению с аппаратами другого типа имеет более высокое значение коэффициента массоотдачи, что связано с большей долей массообмена в подрешеточной зоне.

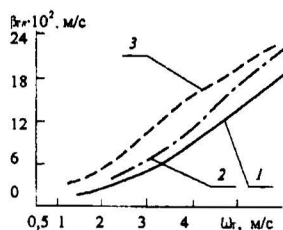


Рис. 1. Зависимость коэффициента массотдачи от скорости газа при  $U=20 \text{ м}^3/\text{ч}\cdot\text{м}^2$ ,  $f=0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ,

1 – аппарат с хордовой насадкой;

2 – аппарат с насадкой из колец Рашига; 3 – аппарат с подвижной насадкой, имеющей смещенный центр тяжести

Особенно перспективным является использование АПН в процессах с переменными нагрузками, т.к. АПН обеспечивает возможность получения различных режимов работы аппарата за счет регулирования технологических параметров среды и конструктивных параметров самого устройства.

Выполнена постановка задачи исследования, которая заключается в изучении ресурсов оптимизации конструктивных параметров ЭПН и их использовании для управления гидродинамическими режимами работы АПН.

**Вторая глава** посвящена разработке теоретических основ конструирования вращающихся элементов подвижной насадки (ЭПН). Путем подбора формы ЭПН удастся либо равномерно распределить вращающиеся тела по объему трехфазной системы и удерживать их в этом состоянии (идеальное вытеснение), либо создать условия для свободного перемещения каждого ЭПН по всему объему трехфазной системы (идеальное перемешивание). Изменение структуры газожидкостной системы достигается за счет изменения конструкции ЭПН, которая позволяет создавать аппаратные модули с заданными свойствами гидродинамической структуры.

Организация вращательного движения ЭПН в объеме аппарата может быть обеспечена за счет ориентации оси насадки в строго вертикальном направлении. Это достигается смещением центра тяжести насадки внедрением внутрь нее ядра, имеющего большую плотность, чем плотность насадки. Насадка, имеющая смещенный центр тяжести, оказывается способной вращаться относительно собственного центра тяжести, сохраняя устойчивое от опрокидывания положение. Вращательная составляющая движения уменьшает поступательные смещения насадки. Каждый ЭПН вращается «на месте», что вызывает дополнительное диспергирование фаз и развивает поверхность их контакта. Такое поведение насадки упорядочивает структуру трехфазного слоя и уменьшает хаотичность перемещения насадочных тел.

На рис. 2 представлена расчетная схема такого ЭПН, испытывающего ударное воздействие со стороны другого насадочного тела. Максимальную вращательную и минимальную ударную составляющую движения ЭПН можно обеспечить за счет минимального расстояния от центра удара до линии действия ударного импульса.

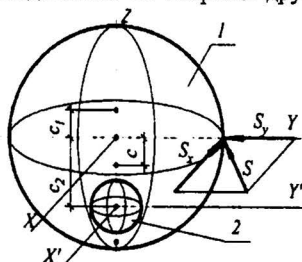


Рис. 2. Расчетная схема насадочного элемента со смещенным центром тяжести: 1 – большой шар; 2 – ядро;  $c_1$  – расстояние между центром тяжести большого шара и центром насадки;  $c_2$  – расстояние между центром тяжести ядра и центром насадки

Из условия минимальности этого расстояния определено оптимальное смещение тяжелого ядра относительно геометрического центра элемента насадки шаровой формы

$$c = \frac{A}{\sqrt{(m_1 + m_2) \cdot \left(1 + \frac{B}{m_1 + m_2}\right)}} = \sqrt{\frac{A}{m_1 + m_2 + B}}, \quad (1)$$

где  $A = \frac{2}{5} \cdot M \cdot r_1^2 - M \cdot \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^3 \cdot \frac{2}{5} \cdot r_2^2 + \frac{2}{5} \cdot m_2 \cdot r_2^2$  – вспомогательный параметр;  $m_1, m_2$  – массы

большого шара с вырезом и ядра, кг;  $M$  – масса большого сплошного шара, кг;

$B = M \cdot \left( 1 - (r_2/r_1)^3 \right) \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot k \cdot (r_2/r_1)^3}{1 - (r_2/r_1)^3} \right) + m_2 \cdot (k-1)^2 - M \cdot (r_2/r_1)^3 \cdot k^2$  – вспомогательный параметр;  $r_1,$

$r_2$  – радиусы большого шара и ядра, м;  $k = m_2 + M \left( 1 - (r_2/r_1)^3 \right) / m_2 - M (r_2/r_1)^3$  – вспомогательный параметр. Полученная зависимость (1) может быть рекомендована для определения смещения ядра насадочного тела и выбора размеров ядра и элемента насадки из различных используемых материалов.

При моделировании абсорбции в аппарате с насадкой, имеющей смещенный центр тяжести, необходимо учитывать влияние на гидродинамику и массообмен дополнительно создаваемой за счет наличия эксцентриситета вращательной компоненты движения насадки. Дополнительное перемешивание фаз, вызванное вращением насадки, может быть учтено с помощью корректирующего коэффициента вращения  $k_n$ , участвующего в определении числа ячеек идеального перемешивания  $n$ . Назовем коэффициентом вращения отношение кинетической энергии вращательного движения насадочного тела со смещенным центром тяжести к кинетической энергии вращательного движения насадочного тела без смещения центра тяжести

$$k_n = \frac{E_n}{E_n^0} = \frac{I_{OZ_c}^0 \cdot \Omega_x^2}{I^0 \cdot \Omega_x^2},$$

где  $I^0$  – главный момент инерции шара,  $I_{OZ_c}^0$  – момент инерции насадки относительно оси  $OZ_c$ , кг·м<sup>2</sup>;  $\Omega_x$  – проекция вектора угловой скорости насадки на ось  $OX$ .

Для оценки зависимости величины  $k_n$  от размеров и плотностей насадки проведен численный эксперимент с помощью MathCAD-программы. Для диапазона эксцентриситетов между геометрическим центром насадки и центром ее тяжести  $c = 2 \div 5,5$  мм коэффициент вращения находится в интервале значений  $k_n = 1,05 \div 1,5$ .

Для насадки без смещения центра тяжести число ячеек идеального перемешивания в одной секции абсорбера определяется через критерий подобия Пекле для неподвижной насадки. Тогда для сферической насадки со смещенным центром тяжести число ячеек может быть определено как

$$n = k_n \cdot \frac{Pe_x^2}{2 \cdot (Pe_x - 1 + e^{-Pe_x})}.$$

Использование в АПН насадочных тел отличных по массе и размерам способствует созданию однородной структуры псевдооживленного слоя, что повышает эффективность поглощения газообразных компонентов. При проектировании аппаратов с такой насадкой возникает проблема выбора оптимального соотношения размеров и количества элементов насадки. Поскольку, скорость движения ЭПН главным образом зависит от массы, можно управлять скоростью его движения в потоке, выбирая массу. Уравнение движения ЭПН под действием внешних сил было представлено в виде

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = (G - A) - F_x + F_c \text{ или} \\ \left( \frac{\pi \cdot d_{ш}^3}{6} \cdot \rho_{ш} + \frac{\pi \cdot d_{ш}^3}{g} \cdot \sigma \right) \cdot \frac{dv}{dt} =$$

$$= \left( \frac{\pi \cdot d_w^3}{6} \cdot \rho_w + \frac{\pi \cdot d_w}{g} \cdot \sigma - \frac{\pi \cdot d_w^3}{6} \cdot \rho_r \right) \cdot g - C_x \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} \cdot \rho_r \cdot \frac{(v_r + v_r)^2}{2} + L \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} \cdot (v_k - v) \quad (2)$$

где  $m$  – масса насадки, кг;  $dv/dt$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $G$  – сила тяжести, Н;  $A$  – архимедова сила, Н;  $F_x$  – сила сопротивления со стороны потока, Н;  $F_c$  – сила давления жидкости, Н;  $\rho_w$  – плотность материала насадки, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления;  $v_r$  – скорость газа, м/с;  $L$  – плотность орошения, кг/м<sup>2</sup>·с;  $v_k$  – скорость капли жидкости, м/с;  $d_w$  – диаметр тела, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Уравнение (2) имеет общее решение

$$v(t) = -\frac{C}{2 \cdot B} \cdot v_r + \frac{R}{2 \cdot B} \cdot \operatorname{th} \left( \frac{R/2 \cdot A \cdot t - \operatorname{Arctg} \frac{-C/2 \cdot B - v_r}{R/2 \cdot B}}{R/2 \cdot B} \right),$$

где  $A = \frac{\pi \cdot d_w^3}{6} \cdot \rho_w + \frac{\pi \cdot d_w}{g} \cdot \sigma$ ;  $B = C_x \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} \cdot \rho_r$ ;  $C = L \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4}$ ;  $D = \frac{\pi \cdot d_w^3}{6} \cdot \rho_r$ ;

$$R = \sqrt{C^2 + 4 \cdot B \cdot ((A - D) \cdot g + C \cdot (v_r + v_k))}.$$

Дальнейшая оценка взаимосвязи плотности и размеров проведена из условия равенства скоростей движения насадочных тел, имеющих разные размеры. При отсутствии орошения ( $L = 0$ ) отношение плотностей насадочных тел будет иметь вид

$$\frac{\rho_{w1}}{\rho_{w2}} = \frac{d_{w2}}{d_{w1}} \cdot \frac{C_x \cdot \rho_r \cdot v_r^2 / 2 - 4 \cdot \sigma / d_{w1}}{C_x \cdot \rho_r \cdot v_r^2 / 2 - 4 \cdot \sigma / d_{w2}}. \text{ При } L \rightarrow \infty \text{ имеет место асимптотическое приближение}$$

отношения плотностей насадочных тел к зависимости  $\rho_{w1}/\rho_{w2} = d_{w2}/d_{w1}$ .

Исходя из условия необходимости обеспечения минимальной порозности слоя насадки в статическом состоянии, выполнена формулировка задачи поиска оптимального соотношения количества крупных и мелких насадочных тел

$$\epsilon_{x, \text{opt}}(X_V) = \min_{X_V, d_{w2}/d_{w1}} \left\{ \epsilon_x = 1 - \frac{1 - \epsilon_{x2}}{(1 - X_V) + \alpha \cdot X_V \cdot (1 - \epsilon_{x1})} \right\} \Big|_{0 < \epsilon_{x1} < 1; 0 < X_V < 1},$$

где  $X_V$  – доля объема, занимаемая крупными шарами;  $\epsilon_{x2}$  и  $\epsilon_{x1}$  – порозности слоя только мелких шаров и слоя только крупных шаров соответственно;  $\alpha$  – дополнительное пространство, необходимое для контакта более крупных тел с более мелкими.

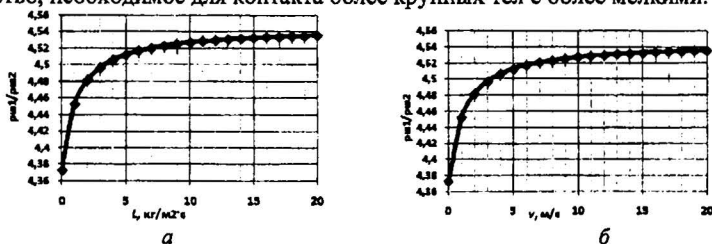


Рис. 3. Зависимость отношения  $\rho_{w1}/\rho_{w2}$ : а – от плотности орошения; б – от скорости газа

Оценка влияния режимных параметров на отношение плотностей насадочных тел выполнена в среде MathCAD (рис. 3). Скорости и плотности орошения варьировались в диапазонах:  $v_r = 1 + 20$  м/с и  $L = 1 + 20$  кг/м<sup>2</sup>·с.

**В третьей главе** представлены результаты моделирования и оптимизации, выполненной с помощью разработанной математической модели абсорбции аммиака в абсорбере с подвижной шаровой насадкой, имеющей смещенный центр тяжести. Моделирование формализованного в виде физико-химической системы процесса абсорбции аммиака водой в АПН проводилось с позиций системного анализа, предполагающего расчленение системы на отдельные элементы (физические и



химические эффекты) и их связи (материальные, энергетические, формационные) совокупность которых образует структуру системы. В качестве элементарного функционального оператора рассматривается математическое описание процессов в ячейке идеального перемешивания. Химическая кинетика процесса описывается зависимостью константы равновесия растворения аммиака в воде от температуры с учетом парциального давления аммиака в газовой фазе, находящейся в состоянии равновесия с раствором аммиака определенной концентрации

$$\lg m_{pc} = 4,705 - 1922/T,$$

причём  $m_{pc} = p^*/C$ , где  $p^*$  – парциальное давление аммиака в газовой фазе, находящейся в состоянии равновесия с раствором аммиака концентрацией  $C$  (кмоль/м<sup>3</sup>);  $T$  – температура, К. Для практических расчетов удобнее пользоваться константой равновесия в безразмерном виде  $m_c = C_r^*/C_*$ , которую можно определить по величине  $m_{pc}$ , используя зависимость

$$m_c = m_{pc}/R \cdot T_*,$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, м<sup>3</sup> бар/(кмоль °С).

В основу описания процесса массопередачи положены зависимости объемного коэффициента массопередачи  $K_{rv}$ , отнесенного к газовой фазе, от объемных коэффициентов массотдачи в газовой и жидкой фазах соответственно ( $\beta_{rv}$ ,  $\beta_{жv}$ )

$$K_{rv} = 1 / \left( \frac{1}{\beta_{rv}} + \frac{m_c}{\beta_{жv}} \right),$$

где  $\beta_{rv}$  и  $\beta_{жv}$  определены как

$$\beta_{rv} = 223 \cdot w^{1,61} \cdot U^{0,24} \cdot H_{ст}^{-0,39} \cdot f^{-0,55} \cdot d_w^{-0,29} \cdot \rho_w^{0,27} \text{ и } \beta_{жv} = 2,52 \cdot w^{1,36} \cdot U^{0,59} \cdot H_{ст}^{-0,4} \cdot f^{-1,3}, \text{ ч}^{-1},$$

где  $U$  – плотность орошения, м/ч;  $f$  – доля свободного сечения решетки;  $H_{ст}$  – статическая высота слоя, м.

Использование ячеечной модели позволяет достаточно точно описать структуру потоков в гидродинамическом режиме развитого псевдооживления. Количество удерживаемой в слое жидкости, выраженное в долях от динамического объема слоя  $\delta$  и степень расширения слоя  $k$  определено по соотношениям

$$\delta = 0,0011 \cdot U^{0,6} \cdot d_w^{-0,5} + 0,02 \text{ и } k = 1 + 0,18 \cdot (w - w_{кр})$$

где  $w$  – скорость газа, м/с;  $w_{кр}$  – скорость начала псевдооживления орошаемого слоя, м/с.

Число единиц переноса  $N$  на одну секцию найдено по уравнению

$$N = K_{rv} \cdot H_{ст} / 3600 \cdot w.$$

Число ячеек идеального перемешивания в одной секции аппарата определено через критерий подобия Пекле для псевдооживленной насадки  $Re_{ж}$

$$n = \frac{Pe_{ж}^2}{2 \cdot (Pe_{ж} - 1 + e^{-Pe_{ж}})} \text{ и } n' = n \cdot k_*,$$

где  $k_*$  – коэффициент, учитывающий вращение элементов насадки, которое возникает из-за смещения центра тяжести насадки относительно ее геометрического центра.

Критерий Пекле для псевдооживленной насадки определяется как функция продольного перемешивания  $F(\Delta)$ , степени расширения слоя  $k$  и критерия Пекле для неподвижной насадки  $Re_{ж,0}$

$$Re_{ж} = Re_{ж,0} \cdot k \cdot F(\Delta) \cdot (D_x/d_w)^{0,304},$$

где  $D_x$  – диаметр аппарата, м.

Критерий  $Re_{ж,0}$  в свою очередь зависит от критериев гидродинамического подобия Рейнольдса ( $Re_{ж}$ ) и Галилея ( $Ga$ ) для жидкости

$$Re_{\pi,0} = 0,125 \cdot Re_{\pi}^{0,78} \cdot Ga^{\frac{1}{3}} \cdot H_{\pi} / d_{\pi}.$$

Степень псевдооживления  $\Delta$  определялась как  $\Delta = (w - w_{\pi}) / w_{\pi}$ .

Численное значение величины продольного перемешивания определено по следующими зависимостями

$$\ln F(\Delta) = -1,801729 + 0,110745 \cdot \Delta -$$

$$-1,501386 \cdot \ln \Delta$$

при  $\Delta < 1,2$ ;

$$F(\Delta) = 0,529494 - 0,138216 \cdot \Delta^2 -$$

$$-0,464515 \cdot \Delta^3$$

при  $\Delta \geq 1,2$ .

Для  $i$  секций колонны число ячеек идеального перемешивания и число единиц переноса на одну ячейку полного перемешивания соответственно

$$n = n' \cdot i \text{ и } N' = N / n'.$$

Вспомогательная величина  $q$  и абсорбционный фактор  $A$

$$q = \frac{1}{A} + \left(1 - \frac{1}{A}\right) \cdot e^{-N'} \text{ и } A = l / m_c$$

Степень извлечения для двух секций и объем псевдооживленного слоя с учетом степени расширения слоя

$$\varphi = (1 - q^n) \cdot A / (A - q^n) \text{ и } V_{\pi 0} = V_{\pi} \cdot k = S \cdot H_{\pi} \cdot k.$$

Гидравлическое сопротивление одной секции определялось по уравнению

$$\Delta p = 32,1 \cdot w^{0,82} \cdot U^{0,56} \cdot H_{\pi}^{0,6} \cdot f^{-1,03} +$$

$$+ \zeta \cdot \rho_r / 2 \cdot (w / f)^2 + g \cdot \rho_r \cdot H_{\pi} \cdot (1 - \varepsilon_0),$$

где  $\zeta$  – коэффициент сопротивления решетки;  $\varepsilon_0$  – порозность слоя.

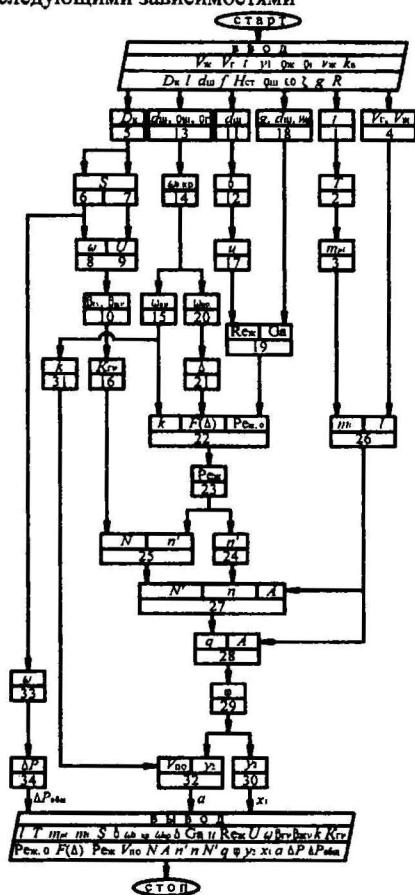


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета процесса абсорции аммиака в абсорбере с подвижной вращающейся насадкой, имеющей смещенный центр тяжести

Для проверки достоверности результатов моделирования в отношении извлекающей способности по аммиаку и величины гидравлического сопротивления были проведены экспериментальные исследования АПН. Принципиальная схема опытной установки, снабженной насадкой со смещенным центром тяжести, представлена на рис. 5. Концентрация аммиака определялась путем титриметрического анализа. Перепад давления в секциях колонны измерялся пьезометрами 26 и 27.

Расхождение между результатами, полученными по математической модели и опытными данными (при нагрузке по газу до 160 м<sup>3</sup>/ч) в отношении извлекающей способности по аммиаку не превышает 7%. Расхождение между результатами моделирования и эксперимента по величине гидравлического сопротивления составило соответственно  $\pm 6\%$ . Результат оценки адекватности модели можно считать

приемлемым с точки зрения ее способности отражать изменение основных параметров с погрешностью не выше допустимой.

При проведении оптимизации в качестве критериев оптимальности использовались гидравлическое сопротивление и удельная интенсивность абсорбции.

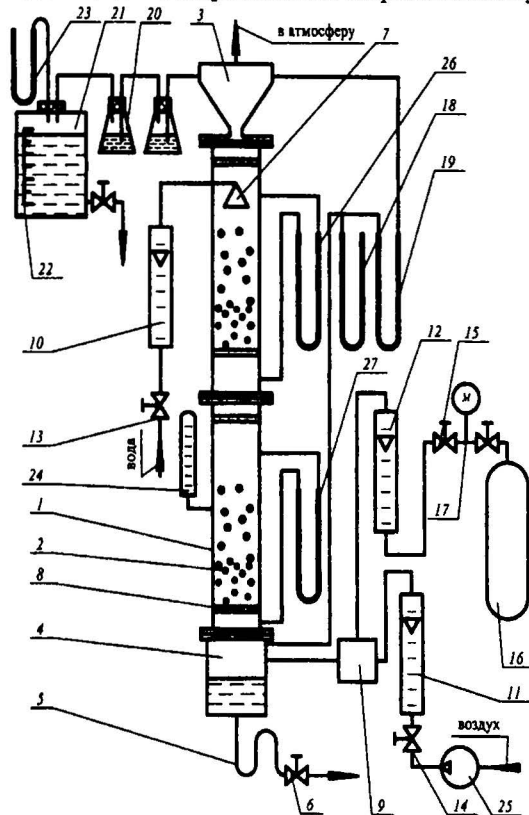


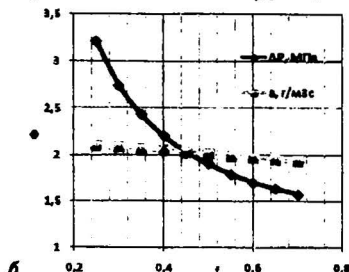
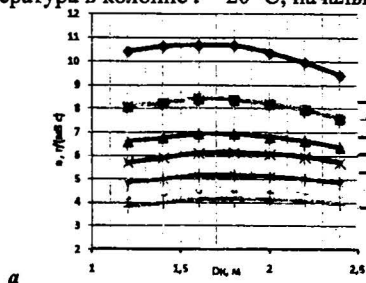
Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – колонна; 2 – насадка; 3 – каплеуловитель; 4 – бак; 5 – гидрозатвор; 6, 13, 14, 15 – вентиль; 7 – брызгало; 8 – опорно-распределительная решетка; 9 – смеситель; 10, 11, 12 – ротаметр; 16 – баллон аммиака; 17 – редуктор; 18, 19, 23, 26, 27 – пьезометр; 20 – поглотительные склянки; 21 – аспиратор; 22 – шкала, 24 – термометр; 25 – вентилятор

Удельная интенсивность абсорбции аммиака показывает какое количество газа поглощается за одну секунду одним кубическим метром объема псевдооживленного слоя.

Удельной интенсивностью абсорбции ( $\text{г/м}^3 \cdot \text{с}$ ) было названо отношение разности начальной и конечной концентрации аммиака в газовой фазе к псевдооживленному объему с учетом объемной производительности по газу

$$a = \frac{V_r \cdot (y_1 - y_2)}{V_{\text{до}} \cdot 3600}$$

Процедура определения оптимальных параметров выполнена с использованием прямого поиска методом поочередного изменения переменных. На первом этапе определены диапазоны варьирования параметров АПН (табл. 1). Расчеты проводились для четырех основных конструктивных параметров:  $D_{\text{ко}}$ ,  $\rho_{\text{ш}}$ ,  $f$ ,  $H_{\text{ст}}$ . Режимные параметры соответствовали значениям: расход газа  $V_r = 30000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; расход жидкости  $V_{\text{ж}} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; температура в колонне  $t = 20^\circ \text{C}$ ; начальная концентрация аммиака в газе  $y_1 = 1,2 \text{ г/м}^3$ .



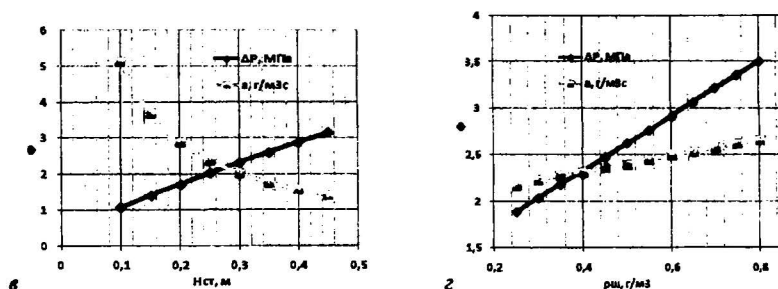


Рис. 6. Графическая интерпретация результатов оптимизации:

$a$  – диаметра абсорбера;  $b$  – доли свободного сечения;

$\alpha$  – высоты статического слоя;  $z$  – плотности материала насадки

Оптимизация диаметра аппарата проводилась по критерию удельной интенсивности. Для других конструктивных параметров проведена двухкритериальная оптимизация: по удельной интенсивности абсорбции и гидравлическому сопротивлению  $\Delta p$ . Результаты представлены на рис 6 и в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оптимизационных исследований по конструктивным параметрам

Параметр конструкции	Диапазон изменения	Перепад давления, кПа	Удельная интенсивность, г/м <sup>3</sup> ·с	Оптимальное значение
Диаметр колонны, м	2,4 ... 1,0	1,4 ... 4,7	6,4...6,6	1,7
Высота статического слоя, м	0,45 ... 0,1	3,2 ... 1,1	4,2...14,9	0,275
Доля свободного сечения	0,7 ... 0,25	1,6...3,2	6,5...7,3	0,45
Плотность насадки, кг/м <sup>3</sup>	800...250	3,5 ... 1,9	8,6...6,7	400

Результаты оптимизации режимно-технологических параметров по критерию удельной интенсивности (при фиксированных значениях конструктивных параметров) представлены на рис. 7. Оптимальное значение объемного расхода газа определилось как  $V_r = 40000$  м<sup>3</sup>/ч при расходе жидкости  $V_{ж} = 40$  м<sup>3</sup>/ч.

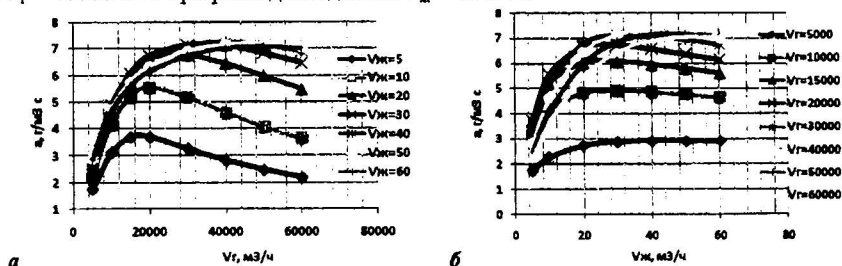


Рис. 7. Зависимость удельной интенсивности:  $a$  – от объемного расхода газа;

$b$  – от объемного расхода жидкости

Выполнена оценка абсолютной и относительной чувствительности модели по основным конструктивным параметрам. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что более высокая параметрическая чувствительность величины гидравлического сопротивления модели наблюдается при варьировании доли свободного сечения опорной решетки, причем максимальная чувствительность соответствует наименьшим значениям  $f$ . Для показателя конечной концентрации аммиака в газовой фазе наибольшая чувствительность модели соответствует изменению высоты статического слоя насадки, причем увеличение  $H_{ст}$  повышает относительную чувствительность математической модели.

**В четвертой главе** рассмотрены ресурсы организации движения насадных тел. При использовании аналогии с мономолекулярными системами выполнен анализ распределения энергии, обмен которой происходит при столкновении ЭПН с другими телами. На основе положений теории бильярдов Синая рассмотрено взаимодействие подвижных шаровых элементов. Получены выражения для числа столкновений насадных тел на прямой и в «сосуде» с упруго отражающими краями

$$N(m_1, m_2, \dots, m_n) \leq 2 \cdot \left( 16 \cdot \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i} \right) \cdot \sqrt{M_2 \cdot M - M_1^2} \right)^{n-1},$$

$$N(t) \leq \left( \left\lfloor \frac{t}{\Delta t} \right\rfloor + 1 \right) \cdot N_{3n} \leq N_{3n} \cdot \sqrt{\frac{m_{\min}}{2 \cdot E}} + N_{3n} = c_1 \cdot t + c_2,$$

где  $m_1, m_2, \dots, m_n$  – массы шаров;  $n$  – количество шаров в системе;  $M$  – масса всех шаров;  $M_1$  и  $M_2$  – первый и второй моменты соответственно;  $c_1$  и  $c_2$  – константы, не зависящие от скоростей шаров, а зависящие только от массы;  $\Delta t$  – промежуток времени;  $E$  – кинетическая энергия всей системы;  $m_{\min}$  – минимальная масса шара.

Полученная динамическая модель может быть применена в качестве инструмента исследования динамики псевдооживленного слоя шаровой насадки в широком диапазоне конструктивных параметров.

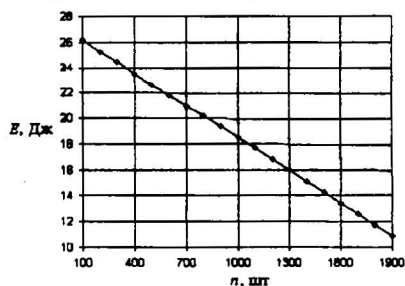


Рис. 8. Зависимость кинетической энергии насадки от их количества

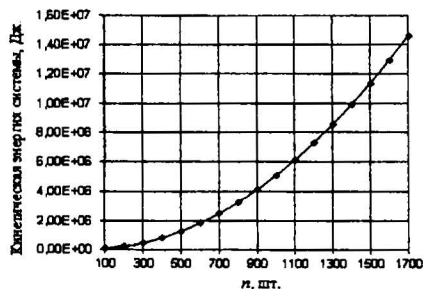


Рис. 9. Зависимость кинетической энергии системы от количества элементов насадки

В качестве примера рассмотрен случай распределения массы по элементам насадки для условий: общая масса всех ЭПН составляет  $M = 6$  кг; масса тел распределяется от начального значения  $m_1 = 1$  г до значения  $m_n$  в интервале числа ЭПН  $n = (100 + 1700)$  шт. по линейному закону; скорости тел в диапазоне от  $v_1 = 1$  м/с до  $v_n = 6$  м/с распределяются по линейному закону. В результате счетного эксперимента, выполненного с помощью MathCAD, получены зависимости: числа столкновений элементов в системе, общего импульса системы, суммарной кинетической энергии, максимального импульса и числа быстрых промежутков от количества ЭПН. Эти зависимости (рис. 8, 9) свидетельствуют, что с увеличением числа ЭПН кинетическая энергия системы возрастает, а кинетическая энергия отдельного элемента убывает.

С помощью динамической модели проведены счетные эксперименты по изучению различных способов распределения массы по элементам насадки. Результаты свидетельствуют о преимуществах квадратичного распределения массы относительно линейного. Так при квадратичном распределении более чем в два раза увеличиваются количество столкновений между ЭПН и кинетическая энергия (рис. 10). Проведенные исследования показали, что с помощью инструмента выбора массы и количества ЭПН можно повысить активность элементов насадки в псевдооживленном слое, что приводит к активизации взаимодействия между фазами.

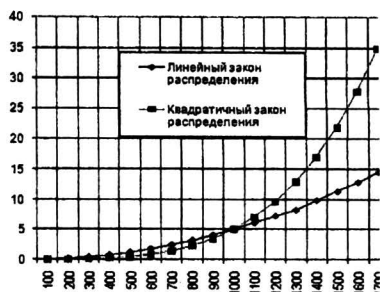
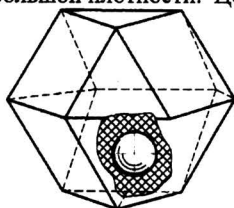


Рис. 10. Зависимость кинетической энергии системы (МДж) от количества элементов насадки

Для случая равномерного псевдооживления объема аппарата, наблюдаемого при малых значениях критерия Архимеда, рассмотрены теоретические модели структур однородного псевдооживленного слоя. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что в слое из достаточно большого числа ЭПН средняя потенциальная энергия элемента насадки пропорциональна высоте слоя. Причем, именно в случае однородного псевдооживления, высота слоя будет минимальной, а на долю каждого элемента насадки будет приходиться наименьший объем слоя.

Постоянное вращение ЭПН обеспечивает высокую интенсивность перемешивания фаз только при условии, если поверхности насадки свойственны эффективные перемешивающие качества. Для создания в АПН устойчивой гидродинамической обстановки развитого псевдооживления с противоточным движением фаз и уменьшения продольного перемешивания предлагается использовать многогранные ЭПН в форме кубооктаэдра. Внутрь ЭПН (рис. 11) помещено ядро большой плотности. Центр тяжести ЭПН смещен так, чтобы обеспечить прохождение

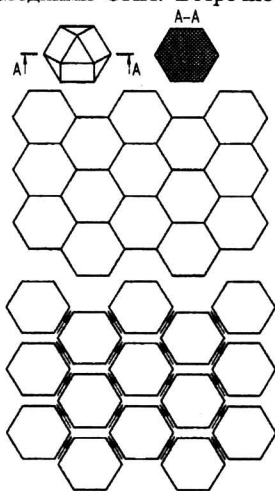
Рис. 11. Конструкция элемента подвижной насадки



оси вращения насадки через центры правильных многоугольников, находящихся на противоположных параллельных плоскостях. Тем самым обеспечивается преимущественно вращательные движения насадки в псевдооживленном слое, т.к. поступательное движение в своей «нише», играя роль «волчка», захватывающего и разбрызгивающего жидкость внешней поверхностью. Гидродинамический режим вращения такой насадки характеризуется образованием и сходом вихрей, которые отбрасываются ее боковой поверхностью. Вихри сталкиваются с движущимися навстречу вихрями, создаваемыми соседними ЭПН. Встречное направление вихря формируется расположением ребер и

граней насадки, симметричных относительно горизонтальной плоскости. Такое взаимодействие вихрей создает эффективное перемешивание фаз. ЭПН, благодаря шестигранной форме миделева сечения в вертикальной плоскости, равномерно заполняют пространство зоны псевдооживления, оставаясь каждый в своем слое и перемешивая взаимодействующие фазы только в окрестном объеме (рис. 12). Дополнительно с перемешиванием возникает противоточное движение газа и жидкости вдоль стенок аппарата. Отработавшая жидкость теперь уже не достигает верха псевдооживленного слоя, а поступает на ниже лежащий слой или с последнего слоя проваливается через распределительную решетку. Газ проходит снизу вверх

Рис. 12. Схема заполнения пространства насадочными телами и схема движения фаз в модуле идеального вытеснения



все слои зоны псевдоожижения, промываясь более свежими порциями жидкости. Уходящий газ соприкасается с исходным абсорбентом, над которым парциальное давление поглощаемого компонента равно нулю, и достигается более полное извлечение компонента из газовой фазы, чем в случае полного перемешивания всей зоны псевдоожижения, где уходящий газ соприкасается с концентрированным раствором поглощаемого компонента. При противотоке достигается более высокая степень насыщения жидкости извлекаемым из газа компонентом, что в свою очередь приводит к уменьшению расхода абсорбента. Организованная таким образом гидродинамическая обстановка соответствует модели идеального вытеснения.

**В пятой главе** содержатся практические рекомендации по использованию абсорбционных и пылеулавливающих аппаратов, снабженных подвижной вращающейся насадкой, имеющей смещенный центр тяжести. Опытные-промышленные исследования и практическая реализация работы выполнены по двум направлениям:

- очистка запыленных газов в отделении сушки хлорида калия ОАО «Уралкалий», очистка газообразных выбросов от оксидов серы в производстве бумаги на ОАО «Соликамскбумпром»;
- исследование гидродинамики и эффективности пылеулавливания в АПН, содержащем подвижную насадку со смещенным центром тяжести, в учебном процессе в лабораторном практикуме по курсу «ПАХТ» и процессе дипломного проектирования для специальности «Машины и аппараты химических производств» в БФ ПТУ.

#### **Основные результаты работы.**

1. Разработана методика определения конструктивных параметров ЭПН, имеющего смещенный центр тяжести, и выполнена оценка влияния смещения на гидродинамику и массообмен в АПН. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование насадки со смещенным центром тяжести повышает вращательную подвижность насадки в 1,05 + 1,5 раз, что способствует лучшему диспергированию газа и жидкости и росту поверхности контакта фаз.

2. Решены задачи оптимального распределения насадки по массе и выбора плотности и количества ЭПН, имеющих разные размеры. Выполненные эксперименты подтвердили целесообразность использования насадки такого типа.

3. Разработана математическая модель абсорбции аммиака водой в абсорбере с подвижной вращающейся насадкой, имеющей смещенный центр тяжести. Проведенные эксперименты показали, что в АПН, снабженном насадкой со смещенным центром тяжести, степень извлечения газообразного компонента повышается на 18,6%, а гидравлическое сопротивление снижается на 12,4% в сравнении с АПН, имеющим насадку без смещения центра тяжести.

4. В результате проведенного оптимизационного поиска с использованием математической модели абсорбции аммиака водой были определены оптимальные значения основных конструктивных и режимно-технологических параметров АПН.

5. Проведенная проверка адекватности разработанной математической модели в отношении извлекающей способности по аммиаку и гидравлического сопротивления продемонстрировали способность модели отражать изменение этих параметров с погрешностью не выше допустимой (7% – по степени извлечения аммиака и  $\pm 6\%$  – по гидравлическому сопротивлению).

6. Получено соотношение для оценки числа столкновений элементов насадки между собой в единицу времени, с помощью которого можно определять оптимальные параметры насадки, соответствующие наиболее интенсивному взаимодействию ее элементов между собой.

7. С помощью разработанной динамической модели взаимодействия насадочных тел проведена численная оценка способов распределения массы по ЭПН. Полученные

результаты показали преимущество квадратичного распределения массы относительно линейного.

8. Предложена новая форма насадочного элемента, обеспечивающего гидродинамические режимы близкие к идеальному вытеснению.

**Приложения** содержат тексты программ выполненных вычислительных экспериментов.

#### **Публикации по тематике диссертации.**

##### ***В изданиях перечня ВАК:***

1. Беккер, В.Ф. Очистка промышленных газов в абсорберах с вращающейся подвижной насадкой / В.Ф. Беккер, И.Ф. Киссельман // Экология и промышленность России.– М.: Изд-во «Калвис». № 1. – С. 18-21.
2. Беккер, В.Ф. Методология системного анализа структуры потоков в абсорберах с псевдооживленной насадкой / В.Ф. Беккер, И.Ф. Киссельман // Известия ЮФУ: Журнал. Технические науки. Тематический выпуск: «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». – Таганрог.: Изд-во ТТИ ЮФУ. №2(91). – С. 38-41.

##### ***Монографии:***

3. Киссельман, И.Ф. Методы газоочистки в производстве редких металлов. Учебное пособие/ И.Ф. Киссельман, В.И. Зеленин, В.Н. Рычков // – Екатеринбург.: Изд-во УГТУ - УПИ, 2006. – 108 с.

##### ***Патенты:***

4. Аппаратурно-технологическая линия для переработки агропромышленных отходов / Ю.П. Кудрявский, В.Ф. Беккер, С.А. Онорин, И.Ф. Киссельман и др. // Патент на полезную модель № 41016 с приорит. от 01.06.04. Опубликовано 10.10.2004.
5. Технологическая установка для получения комплексных органоминеральных удобрений из отходов производства. / Ю.П. Кудрявский, В.Ф. Беккер, С.А. Онорин, И.Ф. Киссельман и др. // Патент на полезную модель № 43009 с приорит. от 01.06.04. Опубликовано 27.12.2004.

##### ***Прочие публикации:***

6. Киссельман, И.Ф. Математическое моделирование абсорбции аммиака в колонне с вращающейся псевдооживленной насадкой / И.Ф. Киссельман // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XXI Междунар. науч. конф. Т. 11. – Тамбов.: Изд-во ТГТУ, 2008. – С. 30-31.
7. Киссельман, И.Ф. Оптимизация конструкционных параметров абсорбера с вращающейся псевдооживленной насадкой / И.Ф. Киссельман // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XXI Междунар. науч. конф. Т. 11. – Тамбов.: Изд-во ТГТУ, 2008. – С. 31-32.
8. Южакова, Ю.В. Мокрая очистка промышленных газовых выбросов в абсорбере с вращающейся псевдооживленной насадкой / Ю.В. Южакова, И.Ф. Киссельман, В.Ф. Беккер // Экология и научно-технический прогресс: Материалы VII междунар. научн.-практ. конф. – Пермь.: ПГТУ, 2008. – С. 308-312.
9. Киссельман, И.Ф. Организация движения элементов подвижной насадки в трехфазном псевдооживленном слое / И.Ф. Киссельман, В.Ф. Беккер // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XXII Междунар. науч. конф. Т. 10.– Псков.: ПГПИ, 2009. – С. 147-148.
10. Киссельман, И.Ф. Влияние геометрических параметров элементов насадки на гидродинамику трёхфазного псевдооживленного слоя / И.Ф. Киссельман, В.Ф. Беккер // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XXII Междунар. науч. конф. Т. 10.– Псков.: ПГПИ, 2009. – С. 148-149.



11. Киссельман, И.Ф. Выбор режимно-технологических параметров абсорбера с вращающейся псевдооживленной насадкой / И.Ф. Киссельман, В.Ф. Беккер // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XXII Междунар. науч. конф. Т. 10.– Псков.: ПГПИ, 2009. – С. 59-60.
12. Киссельман, И.Ф. Влияние параметров конструкции на интенсивность абсорбера с вращающейся псевдооживленной насадкой / И.Ф. Киссельман, В.Ф. Беккер // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XXII Междунар. науч. конф. Т. 4.– Псков.: ПГПИ, 2009. – С. 25-26.
13. Демин, Д.Ю. Определение перепада давлений в АПН / Д.Ю. Демин, И.Ф. Киссельман // Молодежная наука Верхнекамья: Материалы третьей регион. конф. – Березники.: Изд-во ПГТУ, 2006. – С. 60-61.
14. Беккер, В.Ф. Влияние распределения массы по объему насадочного тела на структуру потоков в колонне с подвижной насадкой / В.Ф. Беккер, И.Ф. Киссельман // Инновационный менеджмент в производстве и сервисе: Материалы Всерос. научно-практической конф. – Кострома.: КГУ им. Н.А. Некрасова, 2009. – С. 11-14.
15. Киссельман, И.Ф. Влияние формы элементов подвижной насадки на гидродинамику трехфазного псевдооживления / И.Ф. Киссельман, В.Ф. Беккер // Инновационный менеджмент в производстве и сервисе: Материалы Всерос. научно-практической конф. – Кострома.: КГУ им. Н.А. Некрасова, 2009. – С. 15-19.
16. Киссельман, И.Ф. Методы мокрой очистки пыле-газовых аэрозолей./ И.Ф. Киссельман, Ю.П. Кудрявский, В.И. Зеленин//– Екатеринбург.: Новое слово, 2005. –106 с.
17. Киссельман, И.Ф. Исследование гидродинамики аппарата с подвижной насадкой / И.Ф. Киссельман, Ю.П. Кудрявский // Березники.: БФ ПГТУ, 2008. – 20 с.

Соискатель



И.Ф. Киссельман

---

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная  
Печ. л. 1,0. Усл печ.л. 0,93. Уч.–изд.л. 0,97.  
Тираж 100. Заказ 173/2011

---

Редакционно-издательский отдел Пермского государственного технического университета  
Адрес: 614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.  
Отпечатано в ОАО Типограф





10 ~